

論文

[1068] AE法による二次元破壊進展位置標定を用いたコンクリート割裂試験の破壊挙動に関する研究

正会員 ○ 川上 泰司 (東京大学大学院)
 正会員 魚本 健人 (東京大学生産技術研究所)

1. はじめに

AE (ACOUSTIC EMISSION) 法は、物体の破壊が進行していく過程で放出される弾性波を検出し、その弾性波が持つ数々のパラメータを用いて物体を非破壊的に検査する手法である。コンクリート分野でもこの手法は確立されつつあるが、いまだ未解決の問題も多い。

コンクリート分野におけるAE法の適用例として、複数のAE変換子への到達時間差を用いて、AE波発生位置を標定し、破壊進展位置を推定する方法がある。また、AE法は物体内部の破壊を、動的にかつ微視的に追跡することができ、さらには、一瞬で起こるような破壊を調べる場合にも有効であることから、AE法によって新たな知見を得ることが可能であると思われる。

そこで本研究では、AE法という新しい観測手法に着目し、二次元位置標定方法の精度について検討した後、コンクリートの引張強度を求める方法として広く用いられている割裂試験を取り上げ、AE法による二次元位置標定を行った。その際、諸外国で採用されている加圧盤と供試体の間に分布板をはさむ割裂試験方法と、JISで採用されている分布板をはさまない割裂試験方法との比較を行った。そして、最後に割裂試験における破壊進展位置をFEM弾性解析によってシミュレートした。

2. 二次元AE位置標定の原理

3つ以上のAE変換子において、各AE変換子間距離及びAE波速度が既知であるならば、AE波到達時間差を用いて複数の双曲線の交点としてAE波発生位置が求まる。本研究では4つのAE変換子をひし形状に取り付け、向かい合う2つのAE変換子における到達時間差から求めた2本の双曲線の交点として、AE波発生位置を求めた (図-1 参照)。

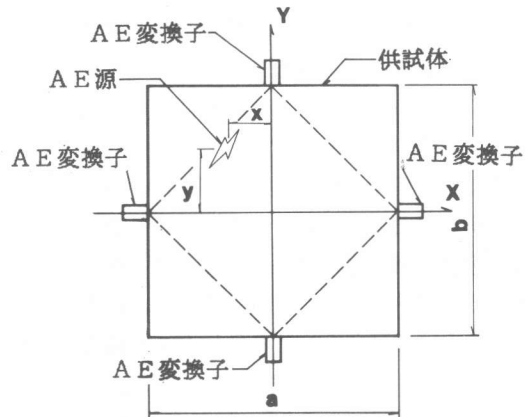


図-1 AE法による二次元位置標定原理

3. 二次元AE位置標定の精度の検討

コンクリート分野において、AE法による二次元位置標定を行う際に生じる誤差として、主に次の3つが考えられる。

- 1) 3次元の物体を2次元として取り扱うことから生じる誤差
- 2) AE計測法に起因する誤差
- 3) コンクリートの不均一性から生じる誤差

上の3項目について実験及び検討を加えた。

3.1 3次元の物体を2次元として取り扱うことから生じる誤差

これはコンクリートに限った問題ではなく、いわば幾何学的な誤差と言い換えることができよう。すなわち、供試体の厚みがあることから生じるわけであり、これを防ぐためにはできるだけ2次元に近い供試体を用意するに越したことはない。しかし、コンクリートの骨材寸法（最大20mm）等を考慮すると、5cm以下とするのは現実的ではない。そこで本研究では、供試体の最小寸法を10cmとして、3次元の物体を2次元として取り扱うことから生じる誤差を無視する事とした。

3.2 AE計測法に起因する誤差

AE計測法にはピーク・タイミング法とイベント・タイミング法の2種類がある。前者は、AE波の最大振幅の時間をAE波到達時間とする方法であり、後者は受信信号の包絡線検波がしきい値を横切る時間をAE波到達時間とする方法である。

コンクリート中を伝播した波は様々な要因で大変複雑な形になることが多く、AE波のピークが2つ現れることも珍しくない。このため2つのピークの大小によって、ピーク・タイミングは著しい誤差を生じる可能性が高い（図-2参照）。また、コンクリート中を伝播した波は一般に立ち上がり時間が遅く、かつ低周波であることが多い。このためイベント・タイミング法を用いた場合、しきい値とAE波の振幅の相対的な関係で到達時間に差が生じる可能性がある。

本研究においてこれら両者のAE計測法に起因する誤差を検討した結果、ピーク・タイミング法を用いた位置評定ではAE変換子の中央で疑似AE波を発信させた場合においても、中央に標定されないことがあること、一方イベント・タイミング法では比較的中央に評定されること、しきい値と比較して振幅がかなり大きいAE波は精度よく標定されることから、イベント・タイミング法を採用し、振幅の大きいAE波のみを表示する事とした¹⁾。実際に疑似AE波を発信させてその位置を標定した結果を図-3に示す。ここでAE波速度は3800m/sとして位置評定を行った。

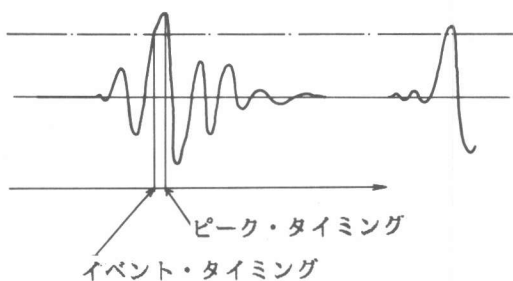


図-2 AE計測法に起因する誤差

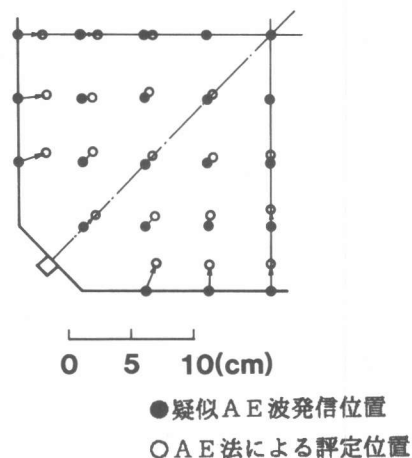


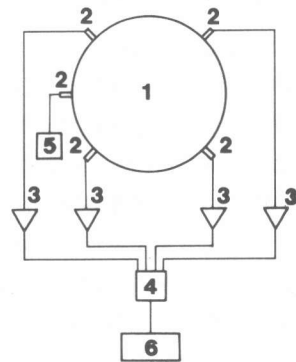
図-3 疑似AE波発信位置評定

3.3 コンクリートの不均一性から生じる誤差

イベント・タイミング法での誤差も、元を正せばコンクリートの不均一性から生じていることになる。しかし、疑似AE波をコンクリート供試体とモルタル供試体に発信したときに、標定位置の精度に差があるかどうかを実験したが、特に差は認められなかった。

4. 割裂試験へのAE法の適用

コンクリートの引張強度を求める方法として円柱供試体に対して、直径方向に載荷する割裂試験が広く利用されており、この方法には大きく分けて2通りある。1つは諸外国に採用されている載荷盤と供試体の間に分布板をはさむ方法で、もう一つはJISに採用されている分布板をはさまない方法である。分布板をはさまない場合、理論上載荷点には無限大の圧縮応力が作用することになり、これが破壊挙動にどのような影響を与えるのかについて、歪ゲージや高速度写真を用いた研究がなされている²⁾。しかしながら、供試体内部の問題にまで検討を加えた例は無い。このような破壊挙動を追跡する上で、AE法による二次元位置標定法は格好の観測手段であると考えられる。



- 1 供試体 4 データ・チェンバー
- 2 AE変換子 5 AEパルサー
- 3 プリアンプ 6 コンピュータ

図-4 AE計測ブロック図

5. 実験概要及び結果

AE変換子は共振周波数60kHzのPZT圧電型加速度ピック・アップを用い、プリ・アンプで40dB増幅した後、データ・チェンバーで検出信号を1V=100dBに相当する信号にLOG化した。しきい値は54dB、不感時間を3msecとした。AE計測システム・ブロック図を図-4に示す。

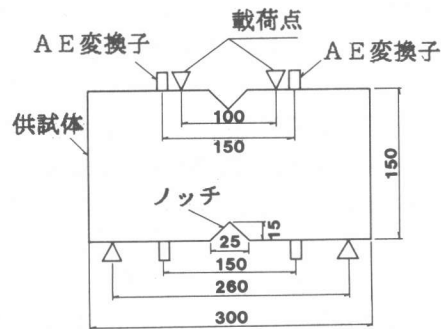


図-5 ノッチ付きコンクリート供試体

5. 1 ノッチ付きコンクリート供試体の曲げ試験における二次元AE位置標定

予備実験として、図-5に示すような位置にAE変換子を取り付けて曲げ試験を行い、二次元位置評定を行った。また、摩擦によるAEの発生を防ぐため、載荷点及び支点と供試体の間に厚さ1mmのテフロンシートを挿入した。AE法による位置標定を行った結果を図-6に示す。但し、振幅が75dB以上のAEのみ表示してある。この図における各円はAEを表し、円の中心が標定位置を、半径が各AEの振幅を表している。すなわち、各円の面積がAE波のエネルギーに比例していることになる。このように、標定位置は破壊断面とかなりの精度で一致していることがわかる。

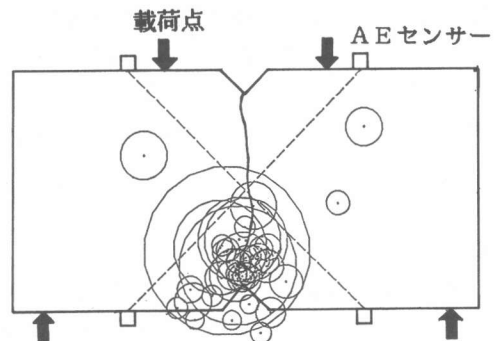


図-6 ノッチ付きコンクリート曲げ試験における二次元AE位置評定図

5. 2 割裂試験における二次元AE位置標定

実験に使用した供試体は、直径10cm, 15cm, 20cm、長さ約 10cmの円柱供試体である。コンクリートは W/C:0.40, 0.55, 0.70の3種類で、スランプ 8 ± 1 cm、空気量 $4 \pm 1\%$ である。分布板は、幅が直径の1/10、厚さが1mmのテフロン・シートを用いた。供試体とAE変換子接着位置の概要を図-7に示す。

AE法による位置標定を行った結果の例を図-8a~8bに示す。この図から、かなりの精度で破壊断面とAE法による標定位置が一致することがわかる。

マイクロ・クラックの長さやAEエネルギーの大きさは比例すると考えられるので、AEエネルギーを標定図に表示することによって、破壊の進行状況を把握できるというメリットがある。

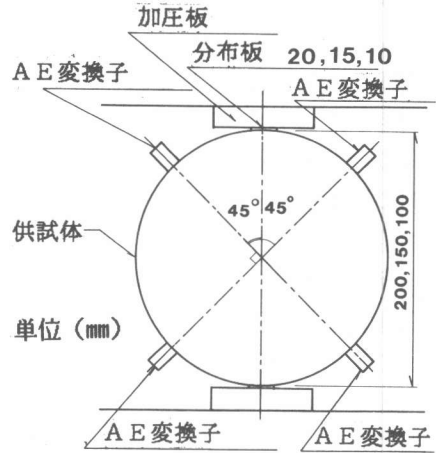


図-7 割裂試験において用いた供試体寸法及びAE変換子取り付け位置

5. 2. 1 分布板を使用した場合

分布板を使用した場合の時系列で追跡した標定図のうちW/Cが0.40の場合を図-9a~9cに示す。これらの図から、上下ほぼ対称に約 $\pm 0.3d$ 付近で破壊が始まり、荷重の増加に伴って中央付近でも破壊が始まる。そして、最終段階でそれらがつながり破壊に至っている。また、引張強度の違いによってAE総数は異なるが、発生傾向の違いは認められなかった。

5. 2. 2 分布板を使用しない場合

分布板を使用しない場合の時系列で追跡した標定図のうちW/Cが0.40の場合を図-10a~10cに示す。これらの図を見ると、分布板を用いた場合と比べて上下対称ではなく、上下どちらかの $0.3d$ 付近で破壊が開始し、それが分布板を用いた場合と比較してゆっくりと伸びて行き、最終的な破壊に至っている。また、引張強度の違いによって発生傾向が異なり、強度が弱い場合では分布板を使用した場合と同じ傾向になった。

6. FEM解析

図-11のようなメッシュに切ってFEM弾性解析を行い、AE二次元位置標定から求めた破壊進展位置と比較検討した。破壊条件は図-12に示すようなモールの応力円を利用し、各メッシュの応力円と破

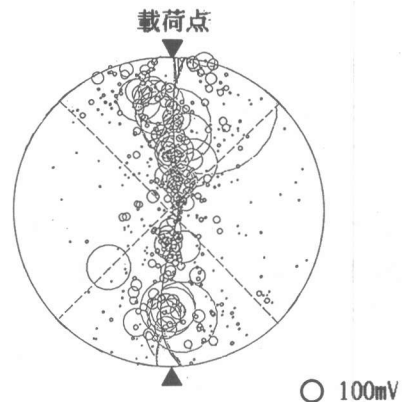


図-8a 割裂試験における二次元AE位置評定図 (W/C=0.40)

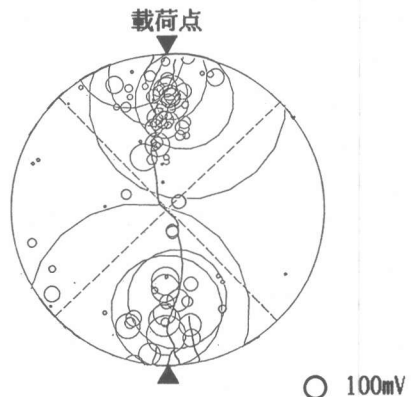


図-8b 割裂試験における二次元AE位置評定図 (W/C=0.70)

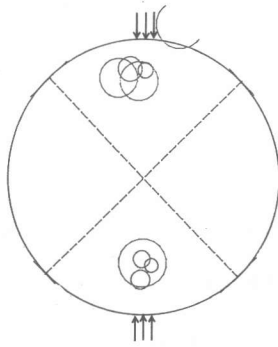


図-9a 0~6.8ton

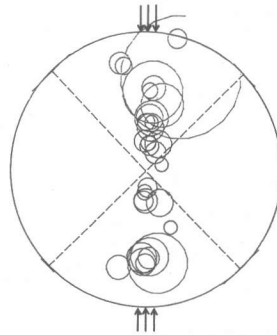


図-9b 6.8~10.8ton

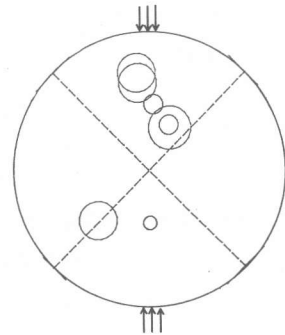


図-9c 10.8~Pmax(11.0ton)

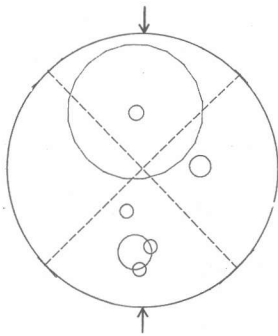


図-10a 0~6.8ton

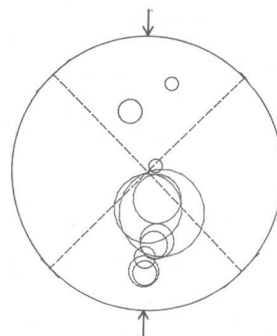


図-10b 6.8~10.8ton

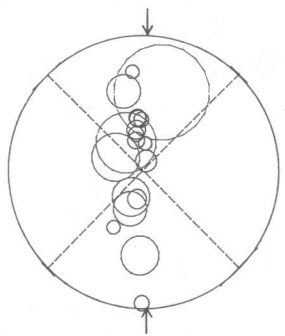


図-10c 10.8~Pmax(12.1ton)

壊包絡線との交点の有無で、破壊、非破壊を判断した³⁾。図における小円は理論上の割裂試験の際の、円柱供試体の中心における応力状態であり、大円は圧縮試験における応力状態を示している。包絡線は両円の外接線と円からなる線であると仮定した。また、引張破壊をした場合には接点の結合を外し、圧縮破壊を起こした場合にはそのメッシュのヤング率を 1/2 にしていった。

FEM解析を行った結果、図-13a~13bに示すような破壊の進展を示し、その破壊開始位置は実験結果とほぼ一致した。また、図13には示していないが、分布板を使用した場合には最初のクラックが発生すると一気に破壊が進展して行くのに対して、分布板を使用しない場合には荷重の増加と共に破壊が進展して行くという結果となり、AEによる結果と一致した。また、分布板を用いた場合の方が高い強度となり、実験結果の傾向とも一致した。

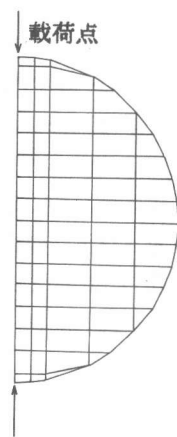


図-11 FEM解析に用いたメッシュ

7. まとめ

1) AE法を用いた二次元位置標定によって、割裂試験のように一瞬で起こる二次元的な破壊位

置を追跡することが可能となる。

2) 二次元位置標定において完全に誤差をなくすことは不可能であるが、AE波の振幅またはエネルギーで補正したり、振幅の大きいAEのみを計測することによってこの誤差を小さくして行くことは可能である。

3) AE法による二次元位置標定から、分布板を用いた割裂試験と分布板を用いない割裂試験では明らかに違う破壊挙動が認められた。すなわち、

ア) 分布板を用いた場合、ほぼ上下対称に $\pm 0.3d$ 付近で破壊が開始し、一気に破壊が進展する。

イ) 分布板を用いない場合、強度の違いによってAE標定図に違いが認められた。すなわち、強度が弱い場合では分布板を用いた場合とほとんど同じであるのに対して、強度が大きい場合では、上下対称に破壊が進展していかず、初めに上下のうち片方の破壊が徐々に進展して行くことが認められた。

4) AE計測結果を確認するためにFEM解析を行った結果、破壊開始位置が中央でないこと、分布板を用いた場合は破壊が一気に進展するのに対し、分布板を用いない場合は荷重の増加と共に破壊が進展して行くことが確かめられた。

【参考文献】

- 1) 川上泰司：AE法による二次元位置標定を用いたコンクリート割裂試験の破壊挙動に関する研究，東京大学修士論文 1988
- 2) 町田篤彦：コンクリートの引張強度に関する研究，土木学会論文報告集297,1978
- 3) 魚本健人、峰松敏和：コンクリートのせん断強度試験方法に関する基礎的研究，コンクリート工学、vol.19, No.4, 1981

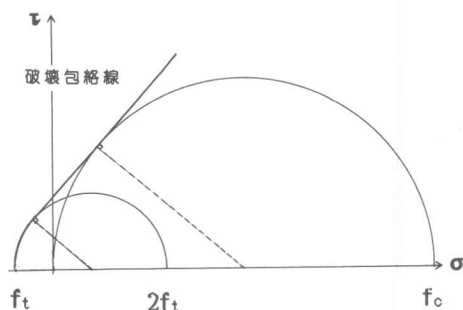
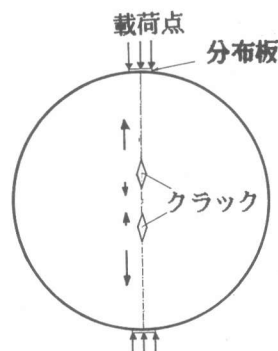


図-1 2 FEM弾性解析に用いた破壊条件



図中の矢印は破壊進展方向を示す

図-13a FEM弾性解析によるクラック進展位置 (分布板使用)

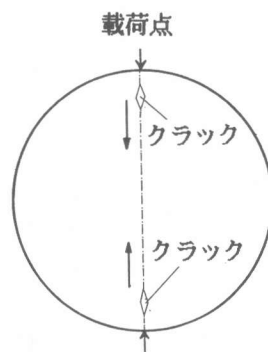


図-13a FEM弾性解析によるクラック進展位置 (分布板不使用)